



PRÁCTICA 3 DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS:

ENSAYO DE UN GRUPO TURBO PARA MOTOR DE AUTOMOCIÓN

Autores: A. Lecuona, P. Rodríguez, C. Vereda.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La [turboalimentación](#) es un recurso bien conocido y actual de aumento de potencia de los MACIs (Motores Alternativos de Combustión Interna) sin necesidad de aumentar su régimen de giro. Consiste en instalar una [turbina](#) (normalmente de tipo centrípeta) en el escape, la cual, generando contrapresión, obtiene un trabajo considerable a causa de la alta entalpía de los gases de escape, con temperaturas entre 400 y 1.000 °C. Este trabajo es comunicado, a través de un eje libre, a un compresor (normalmente de tipo centrífugo) que aumenta la densidad del aire de admisión, comprimiendo con una relación de presiones (π_c) del orden de 2 a 4. El aumento de densidad origina que la cantidad de aire introducido en el MACI es mayor y, por tanto, la cantidad de combustible que se puede quemar también, lo que permite aumentar la potencia sin consumo del eje del motor. [Más información](#). En la Figura 1 se muestra una fotografía de un turbo seccionado donde se pueden ver sus componentes principales así como su distribución.



Fig. 1: Sección de un turbo sin álabes directrices (compresor: izq.; turbina: der.).



El turbo a ensayar es el modelo GTA1749V del fabricante [Garrett®](#), donado por Turmesa. Una aplicación típica es para el Renault Megane II del 2004, que cuenta con un motor 1,9 dCi con 8 válvulas de 120 CV.

A su vez, la combinación turbocompresor-turbina es la base de las turbinas de gas.

El objetivo de la práctica es determinar puntos operativos de las prestaciones de un turbo instalado en un banco de ensayos.

2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

En la Figura 2 se muestra un esquema de la instalación. Como se puede ver, en lugar de un flujo de escape del motor, se ha conectado la entrada de la turbina a la instalación de aire comprimido del laboratorio. Por lo tanto, este aire se encuentra a temperatura ambiente y está desecado, con sólo un 10% de humedad relativa aproximadamente. Esto significa que su punto de rocía está en torno a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

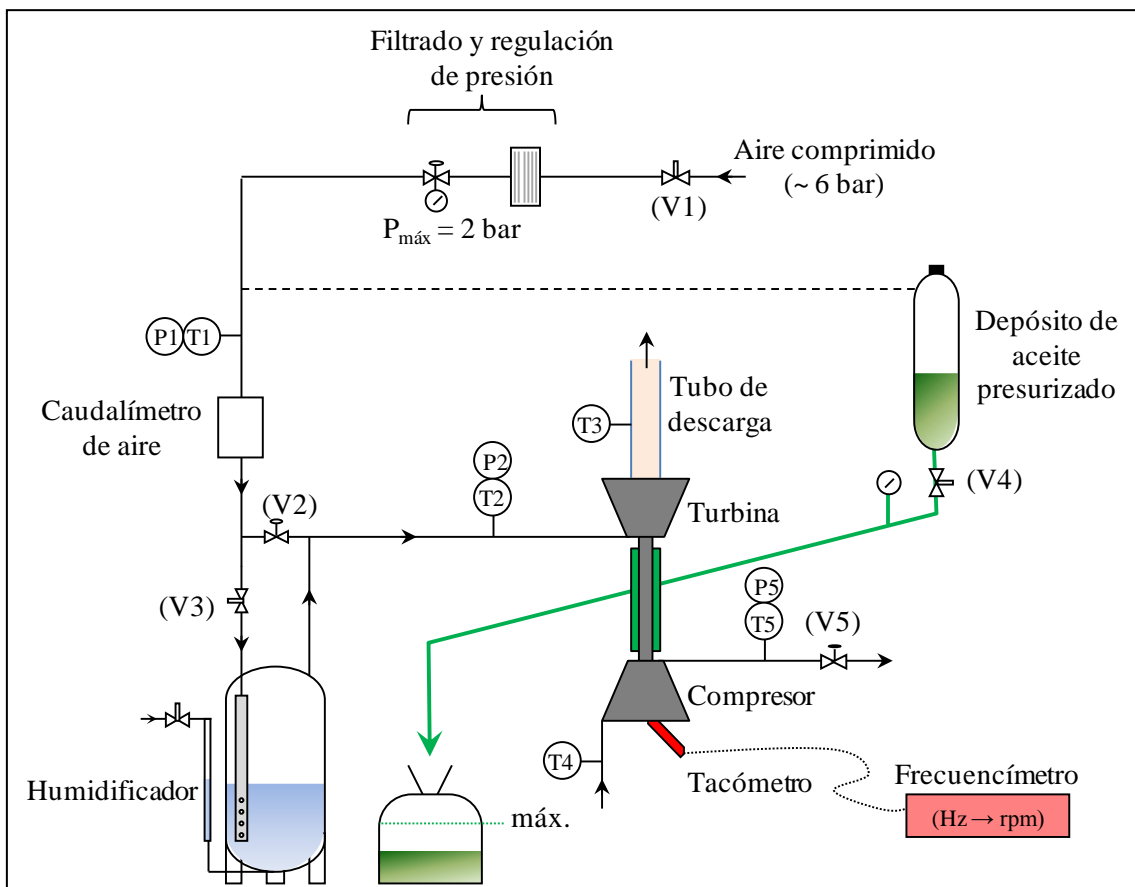


Fig. 2: Esquema de la instalación experimental.



Para visualizar fácilmente las bajas temperaturas resultantes de la expansión en la turbina, se puede agregar humedad al aire comprimido por medio de atomizadores. Así se observará niebla cuando se alcance la temperatura de rocío. La turbina dispone de un tubo de salida transparente, lo que permite visualizar el flujo. Además, en este tubo se encuentra un termopar (T3) para medir la temperatura del flujo de salida.

La turbina utilizada es de geometría variable. En este caso, el método de variar su geometría consiste en orientar unos álabes dispuestos en su estator, de manera que simultáneamente reducen el área de paso e inclinan la corriente en el sentido de la marcha del motor, haciendo que la corriente impacte sobre ellos con una incidencia variable. En la Figura 3 se muestra el principio de funcionamiento de la turbina de geometría variable así como unas fotografías de una turbina similar a la utilizada en la práctica, con el estator seccionado para poder visualizar los álabes orientables.

- De la gran deflexión resultante de cerrar los álabes, el par sobre el rotor es alto, pero la eficiencia de la turbina cae. Por la exigua área de paso resultante es posible engendrar contrapresión cuando el motor sopla poco; esto es, a regímenes de giro bajos y por ello se puede comunicar trabajo al compresor. El resultado es que se puede sobrealimentar el motor desde regímenes bajos, mejorando el par motor.
- Al abrir los álabes del estator es posible limitar la sobrealimentación a regímenes altos del motor, evitando su deterioro. En el banco de ensayos la posición más cerrada es con la palanca de accionamiento en el banco de ensayos en alto. En aplicaciones reales de automoción se puede controlar con la presión a la entrada del motor, como indica la figura.



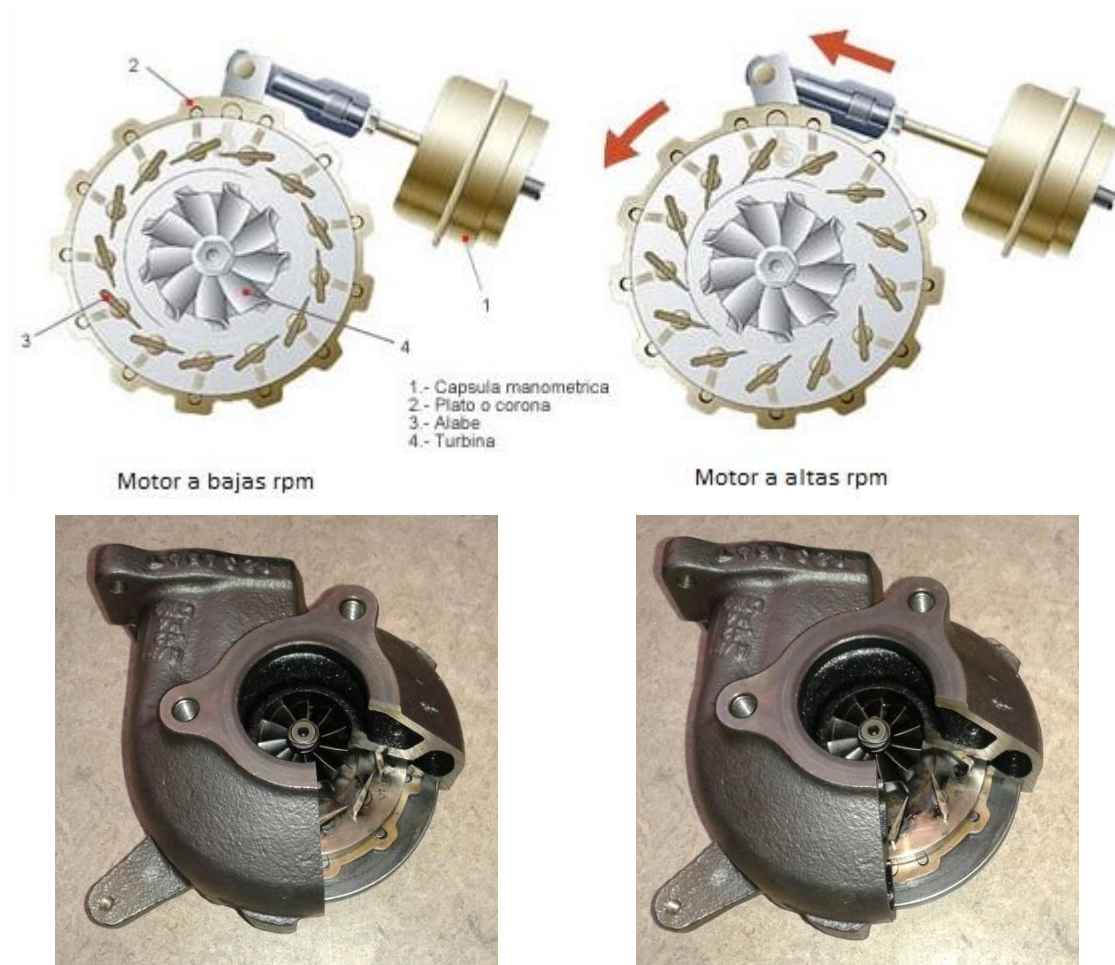


Fig. 3: Arriba: principio de funcionamiento de una turbina de geometría variable [2]. Abajo: fotografías de una turbina similar a la utilizada en la práctica. Izquierda: álabes en la posición de mínima sección de paso (motor a bajas rpm). Derecha: álabes en la posición de máxima sección de paso (motor a altas rpm).

Al compresor se le ha instalado una válvula a su salida (V5) para que engendre compresión (π_C). Si esta válvula se cierra en exceso el compresor entra en bombeo. Esto es perceptible a la entrada del mismo, pues aparece inversión de flujo pulsante y el conjunto se acelera.

Los 12 álabes del compresor disponen de un sensor magnético de su paso, JAQUET TurboTach System®. Consta de un sensor de velocidad, cables de interconexión y cables PCT400 con electrónica activa. Este cable de conexión al frecuencímetro divide digitalmente por 8. Por ello, las rpm resultan ser, partiendo de la frecuencia f :

$$n = \frac{f}{s} \times \frac{8}{12} \times 60 \frac{s}{m} = 40 \times f \text{ rpm}$$

El máximo régimen de giro en la práctica está en unas 120.000 rpm, correspondiendo a una frecuencia de 3.000 Hz. No debe sobrepasarse pues pudiera originar una peligrosa [rotura del rotor](#) ante una perturbación extraña. Sin embargo, se consigna como posible 180.000 rpm.

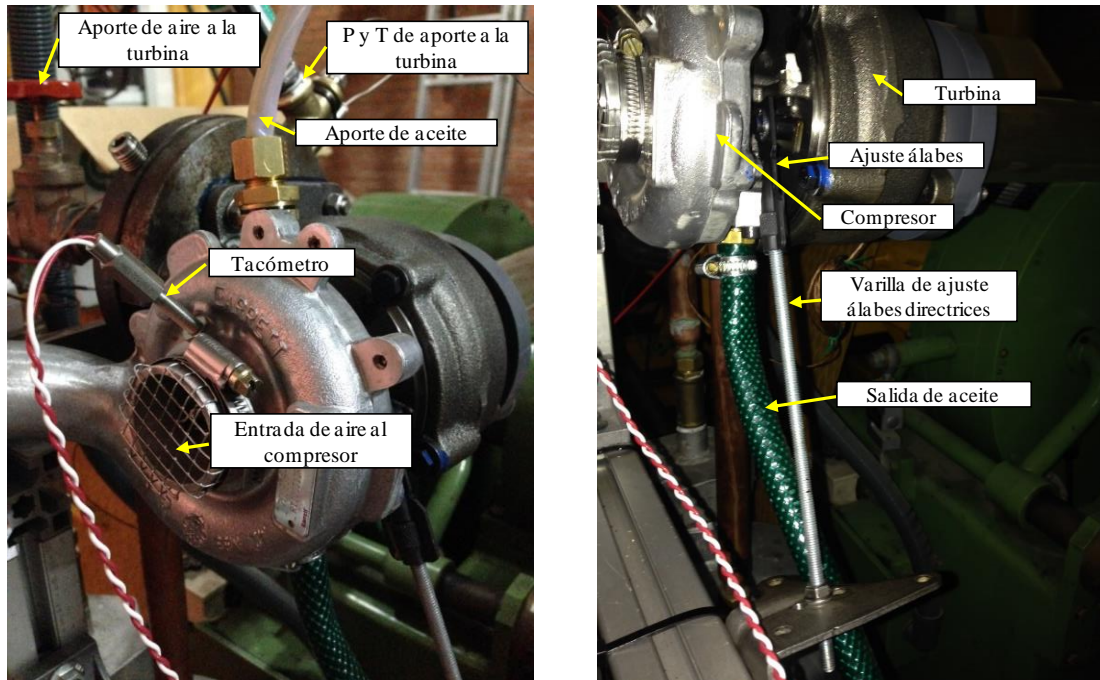


Fig. 4: Izquierda: vista del turbo con el compresor en primer plano. Derecha: vista lateral del turbo.
Fuente: [1].

El eje que une ambas turbomáquinas gira soportado por un cojinete liso, alimentado por aceite a presión, con bajas pérdidas. Éste proviene de un depósito presurizado por el aire comprimido y tras lubricar cae por gravedad a otro depósito de recogida. Ha de vigilarse la tubería de aporte para que siempre esté alimentado. Un manómetro permite conocer la presión de alimentación. La llave de suministro (V4) ha de mantenerse abierta durante la operación.

La presión del aire comprimido puede llegar a 6 bares. Se limita por medio de un regulador de presión, situado en alto, tras los filtros protectores, a un valor máximo de 2 bar, indicado por un manómetro adjunto. Esta regulación es independiente del gasto.



Fig. 5: Izquierda: depósito de presurización del aceite. Derecha: Unidad de regulación y limpieza del aire comprimido. Fuente: [1].

El/los humidificadores están situados en el suelo. Tendrán un nivel de agua que no supera 1/3 de la altura del depósito de atomización. El separador de gotas corriente abajo de este dispositivo se purgará para evitar el paso de agua líquida a la turbina.

3. INSTRUMENTACIÓN

3.1 Caudal de aire

Caudalímetro volumétrico 10VT1000/10VR1000 de la marca Bailey Fischer & Porter®. Con densidad de referencia (ρ_0) muestra el caudal másico. Es necesario corregir el caudal másico indicado por el instrumento (\dot{m}_0) con la temperatura y presión a su entrada:

$$\dot{m} = \dot{m}_0 \frac{\rho}{\rho_0}; \rho_0 = 10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \rho = \frac{p}{R_g T}; R_g = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$





Fig. 6: Caudalímetro de aire en primer plano. Fuente: [1].

3.2 Presiones

- Aire comprimido: manómetro mecánico en el regulador de presión y sensor manométrico electrónico (P1) calibrados en bares, para corrección por densidad con salida de 4-20 mA, que calibrado a 25 bar da 20 mA. Resulta pues:

$$p = \frac{25}{16} \left(\frac{\text{Corriente}}{\text{mA}} - 4 \right) \text{bar}$$

- Aire de suministro a la turbina: sensor manométrico electrónico (P2) con indicación calibrada y regulación por válvula (V2).
- Aceite: manómetro mecánico en la línea de aporte de aceite al turbo.

3.3 Temperaturas

Para medir la temperatura en los distintos puntos se emplean termopares tipo K con un indicador digital en °C con auto apagado. Los puntos del banco de ensayos donde se mide la temperatura son:

- Entrada del aire comprimido (T1): para corregir la densidad de entrada al caudalímetro.
- Entrada a la turbina (T2): si es menor que la entrada del aire comprimido, indica evaporación del agua de humidificación.
- Entrada al compresor (T4): temperatura ambiental.
- Salida del compresor (T5): será superior a la ambiente.
- Salida de la turbina (T3): será inferior a la de entrada a la turbina. Puede llegar a -20 °C.

3.4 Régimen de giro

Tacómetro. Es necesario ajustar el disparo (*trigger*) para obtener indicación correcta. A regímenes muy bajos no indica nada. El cable ha de estar alimentado.

4. SEGURIDAD

- La marcha del turbo genera un ruido muy intenso, por lo que es necesario portar protectores auditivos cuando esté en marcha. Esto dificulta la comunicación hablada, por lo que la coordinación previa es importante.
- Ha de portarse protectores oculares o faciales por si se desprendiera alguna pieza, acelerada por la fuerza del giro.
- No se puede vestir ropas sueltas, corbatas o colgantes que pudieran ser atrapados por la maquinaria. El pelo muy largo ha de ser recogido.
- Siempre han de seguirse las instrucciones del profesor de prácticas, así como del técnico de laboratorio.
- Dada la complejidad de la instalación se requiere vigilancia continua del profesor de prácticas.
- No debe tocarse ningún elemento, salvo permiso del profesor. Pudiera quemar o dar un choque eléctrico.
- Averigüe con antelación las medidas de emergencia existentes.
- Respete los demás aparatos del laboratorio.
- El relleno del depósito de presurización del aceite ha de ser realizado por personal cualificado. Solo puede realizarse después de despresurizar la instalación completamente, y se rellena por el tapón superior.



5. REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

Los pasos a seguir para la correcta realización de la práctica son los siguientes:

1. Tras comprobar que existe aceite en el depósito, se abrirá la válvula de aporte (V4) y se comprobará que la tubería de aporte al turbo se encuentra llena.
2. Se encenderán todos los indicadores, comprobando que miden.
3. Se comprobará que la válvula de aporte de aire a la turbina (V2) se encuentra cerrada.
4. Se comprobará que la válvula de bypass a los humidificadores (V3) se encuentra cerrada. Evita el paso de aire por ese sistema.
5. Se comprobará que la válvula de salida de aire del compresor (V5) está completamente abierta.
6. Tras abrir la válvula de aporte de aire comprimido (V1) se comprobará que el regulador de presión indica 2 bares. Esto limitará el régimen máximo alcanzable por el turbo, pero no de manera absoluta.
7. Se tomará la posición de los álabes directores del estator de la turbina que indique el profesor. Al ser invisibles, se anotará el número de vueltas del actuador, desde cerrado, en % del total hasta abierto, que corresponde a la posición más baja.
8. Se abre paulatinamente la válvula de aporte de aire a la turbina (V2), comprobando visualmente que el eje del compresor gira (como consecuencia del acople entre ambas turbomáquinas) sin vibraciones. Se verificará que el tacómetro mide. No superar 40.000 rpm en este paso, equivalente a 1 kHz. Se podrá comprobar cómo al abrir la válvula aumenta el gasto a la vez que la presión de aporte (P2) y el régimen de giro.
9. Se cerrará la llave de salida de aire del compresor (V5), evitándose el bombeo por cierre excesivo. El compresor actúa de freno de la turbina, por lo que conviene crear contrapresión. Una mayor contrapresión supone un consumo de potencia de la turbina mayor, cayendo su régimen.
10. Se aproxima el punto operativo deseado siguiendo la secuencia que indique el profesor.
11. Si se desea humidificar el aire, se abrirá paulatinamente la llave del sistema de humidificación (V3) y de los humidificadores individuales, caso de existir. Se observará el tubo de salida de la turbina por si aparece condensación en el interior del tubo de descarga, momento en que no se abrirá más la válvula de bypass para evitar un deterioro del rotor de la turbina. Se ha de verificar con el separador de gotas a la salida de los humidificadores que no producen líquido, si es que éste existe. Con el mismo propósito se verificará que no salen gotas por el interior de la pared del tubo de salida de la turbina. Si la válvula de aporte de aire a la turbina (V2) está muy cerrada, el aporte



adicional de aire a través del sistema humidificador puede ser sustancial, modificando el punto operativo y aportando mucha humedad, incluso excesiva. El punto de rocío se manifiesta por la presencia de tan solo ligera niebla. Se facilita su detección con iluminación potente a la salida.

12. Se toman lecturas de los instrumentos en estado estacionario tras el previo acuerdo con el profesor.
13. Se reducirá paulatinamente el gasto de aire con el cierre de la válvula de aporte a la turbina, hasta volver la instalación a su estado inicial, restaurando todos los aparatos a su estado de reposo.

6. TRATAMIENTO DE DATOS

El rendimiento isentrópico de la turbina (η_{sT}) viene dado por la siguiente expresión para gas ideal calorífico perfecto, e es entrada y s es salida. Se asume que la velocidad en las tuberías es lo suficientemente baja para igualar temperaturas estáticas a las totales, o de remanso. La temperatura alcanzada en una evolución isentrópica hasta la misma presión se indica con s :

$$\eta_{sT} = \frac{T_e - T_s}{T_e - T_{s,s}} = \frac{1 - T_s/T_e}{1 - T_{s,s}/T_e} = \frac{1 - T_s/T_e}{1 - \underbrace{\left(\frac{p_s}{p_e}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}_{\doteq \pi_T}}$$

La presión de salida de la turbina se asumirá que es la atmosférica.

El rendimiento isentrópico del compresor (η_{sC}) viene dado por:

$$\eta_c = \frac{T_{s,s} - T_e}{T_s - T_e} = \frac{\frac{T_{s,s}}{T_e} - 1}{\frac{T_s}{T_e} - 1} = \frac{\underbrace{\left(\frac{p_s}{p_e}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1}_{\doteq \pi_C}}{\frac{T_s}{T_e} - 1}$$

Para la presión de entrada al compresor se tomará la atmosférica, ya que su entrada es libre. La aceleración que sufre la corriente a su entrada hace que tanto la presión, como la temperatura, caigan de forma aproximadamente isentrópica, por lo que la atmósfera coincide con las condiciones totales, o de remanso, a su entrada.

La presión atmosférica del día se preguntará al profesor o se buscará en servicios meteorológicos. Alternativamente, se asumirá atmósfera estándar.



7. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

En el informe se describirán sucintamente: la operativa seguida, las incidencias que se han presentado y las mediciones obtenidas.

En una tabla se mostrarán las mediciones obtenidas y los rendimientos calculados. Se comentará el resultado, particularmente lo obtenido en comparación con datos del fabricante.

Se valorará como nota adicional voluntaria la representación gráfica de los resultados para la turbina, expresados como función del parámetro de gasto y expresando el parámetro de régimen en iso-líneas, o al menos indicando sobre los datos numéricamente el valor de Π_n y η .

En definitiva: $\left\{ \begin{matrix} \Pi_e \\ \eta_e \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} f_\pi \\ f_n \end{matrix} \right\} (\Pi_m, \Pi_n)$. Compárese con la curva de un orificio.

$$\Pi_m = \frac{\dot{m}\sqrt{T_e}}{P_e}; \text{ Caudal corregido: } \dot{m}_{corr} = \dot{m} \frac{\sqrt{T_e/T_{e,ref}}}{P_e/P_{e,ref}}$$

$$\Pi_n = \frac{n}{\sqrt{T_e}}; \text{ Régimen corregido: } n_{corr} = n \sqrt{\frac{T_{e,ref}}{T_e}}$$

No hay acuerdo universal para T_{ref} y p_{ref} , por lo que pueden tomarse los de la atmósfera estándar a nivel del mar.



8. CURVAS CARACTERÍSTICAS

8.1 Compresor

Los fabricantes realizan distintas versiones (trimming) de un mismo turbo, variando ligeramente el diámetro de los rotores, aplicando envolventes (estatores) de distintas área de paso, etc. Para la entrada a la turbina se especifica el A/R que es el área mínima de la envolvente dividida por su radio al eje.

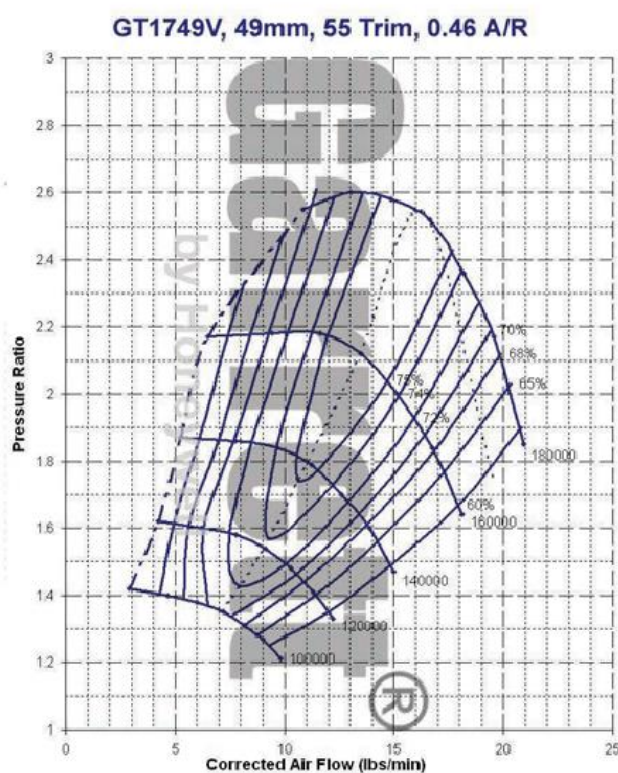


Fig. 7: Características operativas del compresor, según el fabricante: [Información de Garrett](#). [Datos técnicos](#). Fuente: [3].

8.2 Turbina

De la turbina bajo ensayo no ha sido posible encontrar datos publicados. Una idea de cómo han de ser las curvas características de una turbina puede encontrarse en la bibliografía de la asignatura. En la Figura 8 se puede ver un ejemplo de curvas características de una turbina de

geometría fija comparada con una de geometría variable, del fabricante BorgWarner®, sin indicación del rendimiento.

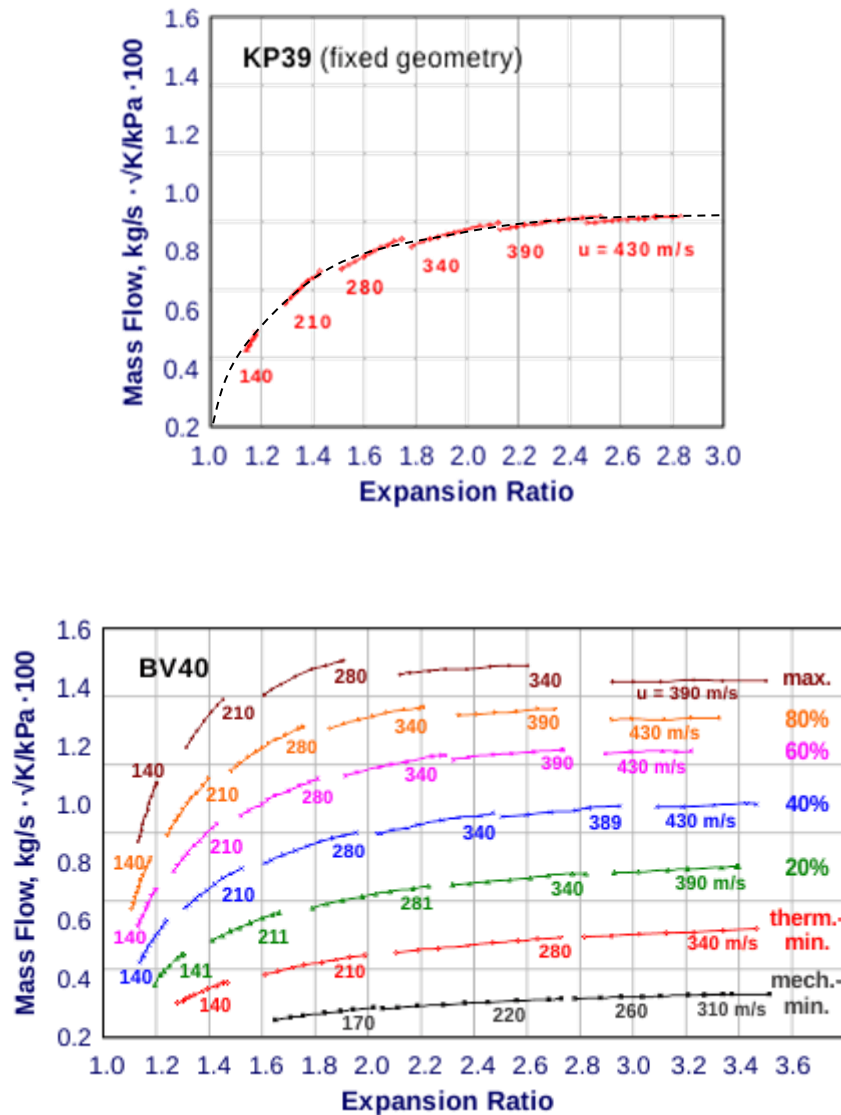


Fig. 8: Características operativas de una turbina, del fabricante BorgWarner®. Fuente: [4].
 Arriba: de geometría fija, indicando la velocidad periférica del rotor. La curva de trazos muestra la curva de un orificio equivalente para los distintos regímenes.
 Abajo: de geometría variable, indicando con color el % de apertura de los álabes directrices. Puede observarse que la apertura tiene el efecto de originar una turbina con mayor capacidad de flujo

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] Luis Suárez-Llanos Outeiriño, TFG. TURBOCOMPRESOR EN BANCO DE ENSAYO. CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS, EPS Universidad Carlos III de Madrid, octubre de 2015.



[2] Dani meganeboy. “Motores sobrealimentados: turbos de geometría variable (VTG)”, aficionadosalamecanica.net, 2014 [en línea]. Disponible en:
http://www.aficionadosalamecanica.net/turbo_vtg.htm [Consulta 2015].

[3] http://www.turbomaster.info/aplicaciones/778445-0001_ES.php

[4] https://www.dieseln.net/tech/air_turbo_vgt.php

